

# Plastische Berechnung von Stahlbetonplatten: ein neues computerunterstütztes Verfahren

Autor(en): **Anderheggen, Edoardo / Steffen, Patrick / Glanzer, Günter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **117 (1999)**

Heft 4

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79686>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Edoardo Anderheggen, Patrick Steffen, Günter Glanzer, Zürich

# Plastische Berechnung von Stahlbetonplatten

## Ein neues computerunterstütztes Verfahren

**Die Bewehrung einer Stahlbetonplatte wird immer öfter allein aufgrund einer elastischen Momentenverteilung bemessen. Hier wird eine neuartige Berechnungsmethode vorgestellt, die plastische Momentenlagerungen berücksichtigt und dadurch, bei geringerem Bewehrungsbedarf, eine ausführungstechnisch vorteilhaftere Anordnung der Stahleinlagen ermöglicht. Basierend auf der Methode der finiten Elemente und der Plastizitätstheorie vereint das Verfahren linear-elastische Analyse, optimierende Bemessung nach dem unteren Grenzwertsatz sowie Duktilitätsbedarfs- und Traglastanalyse.**

Bei der Bemessung einer Stahlbetonplatte nach den modernen Normenwerken (SIA, Eurocode) wird der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit verlangt. Beim ersten ist eine linear-elastische Berechnung angebracht, während beim zweiten das nichtlineare, elastoplastische Verhalten des Stahlbetons, das zu einer Momentenlagerung führen kann, berücksichtigt werden darf. Dank diesen plastischen Schnittkraftumlagerungen können Bewehrungskonzentrationen vermieden und eine rationale und wirtschaftliche Bewehrungsanordnung erreicht werden.

Dennoch wird die Tragsicherheit von Stahlbetonplatten heute in der Regel allein aufgrund einer elastischen Momentenverteilung nachgewiesen, d.h. unter Ausschluss plastischer Verformungen. Der Grund dafür liegt nicht etwa bei der Plastizitätstheorie, deren Anwendbarkeit auf Stahlbeton nicht umstritten ist, sondern ist bei der Art und Weise zu suchen, wie man heute die Methode der finiten Elemente (FEM) in der Praxis einsetzt. Dieses rechnergestützte Verfahren hat in den letzten Jahren die einfachen, auf Gleichgewichtsüberlegungen basierenden Handmethoden (Streifenmethode, Methode der stellvertretenden Rahmen usw.) immer mehr verdrängt, da es auch Strukturen mit komplizierter Geometrie und vielen Lastfällen behandeln kann. Leider lassen sich mittels einfacher, linearer FEM-

Programme nur elastische Spannungsverteilungen berechnen. Um dennoch unvernünftige Bewehrungsanordnungen zu vermeiden, decken die Ingenieure die Momentenspitzen nicht vollständig mit Bewehrung ab und legen als Kompensation dafür in den benachbarten Zonen etwas mehr Bewehrungsstahl ein. Dieses Vorgehen erfordert Intuition und einen beträchtlichen Arbeitsaufwand. Zudem ist es theoretisch zumindest als fragwürdig zu bezeichnen, kann doch kaum mehr von einer Gleichgewichtslösung gesprochen werden.

Neben der Bemessung von neuen Tragwerken ist heute immer öfters eine Abschätzung der Tragsicherheit bestehender Strukturen gefragt, die z.B. infolge Nutzungsänderung neuen Einwirkungen ausgesetzt werden oder durch Korrosion abgeschwächt sind. Die dafür notwendige Traglastanalyse stellt die Ingenieure vor grosse Probleme, da sie mittels linearer FEM nicht bewältigt werden kann. Von den plastischen Traglastverfahren eignet sich einzig die Methode der Fliessgelenklinien für die Praxis. Da sie jedoch auf dem oberen Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie basiert, resultiert in der Regel eine zu hohe Traglast, wobei es nur für einfache Probleme gelingt, diese Überschätzung zu quantifizieren.

Diese unbefriedigende Situation war der Ausgangspunkt für ein grösseres Forschungsprojekt, das unter der Leitung des erstgenannten Autors an der ETH Zürich durchgeführt wurde. Das Ziel dieser Forschungsarbeit bestand darin, eine neue Berechnungsmethode für die Praxis zu entwickeln, welche die Vorteile der plastischen Handmethoden (Gleichgewicht, Effizienz) und der FEM (Allgemeinheit, elastische Lösung, beliebige Superposition von Lastfällen) vereint. Es sollte ein vollständig computergestütztes Verfahren entwickelt werden, das eine effiziente, praxisorientierte Bemessung und Traglastanalyse von allgemeinen Stahlbetonplatten erlaubt. Dabei entstand das interaktive Computerprogramm Platon (*Platten* aus *Stahlbeton*), das auf Unix-Plattformen des Instituts für Baustatik und Konstruktion entwickelt wurde. In diesem Programm sind zwei sich ergänzende neue Berechnungsverfahren, eines für die Bemessung und

eines für die Traglastanalyse implementiert, die in der Folge näher vorgestellt werden.

## Ein neues Bemessungsverfahren

Um allgemeine Stahlbetonplatten behandeln zu können und eine elastische Lösung für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu erhalten, basiert das neue Bemessungsverfahren auf der linearen FEM.

Für eine Bemessung auf Tragsicherheit musste jedoch das elastoplastische Materialverhalten mit berücksichtigt werden. Dabei kam die Anwendung der nichtlinearen FEM, selbst wenn diese bestens bekannt ist, nicht in Frage. Damit lassen sich zwar alle Arten von Nichtlinearitäten einbeziehen, wegen der hohen erforderlichen Anwenderkompetenz und der aufwendigen, getrennten Behandlung von mehreren Lastfällen eignet sie sich jedoch nur beschränkt für praktische Bemessungsaufgaben.

Als zweite Basis für das neue Verfahren wurde der untere Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie verwendet. Durch die Entwicklung von zwei darauf aufbauenden, neuen Grundkonzepten gelang es, Momentenlagerungen zu berücksichtigen und dennoch mehrere Lastfälle effizient zu behandeln. Diese beiden Konzepte, das finite Bemessungselement und die elastoplastische Optimierung, werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Es ist das Ziel einer Bemessung, die Anordnung der Bewehrung zu bestimmen. Wie später erklärt, geht die neue Bemessungsmethode deshalb über die Bestimmung von erforderlichen Bewehrunggehalten hinaus und liefert direkt Stab- und Mattenlagen, welche in ein CAD-Programm zur Detailbearbeitung übertragen werden können.

## Finite Elemente als Bemessungseinheiten

Eine Bemessung aufgrund des unteren (oder statischen) Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie liefert eine Lösung, die auf der «sicheren» Seite liegt, d.h. die Traglast wird unterschätzt. Dabei wird ein Spannungszustand gesucht, der mit der äusseren Belastung im Gleichgewicht steht, der die statischen Randbedingungen erfüllt und nirgends die Fliessbedingungen verletzt.

Die Bestimmung eines exakten Gleichgewichtszustands mittels FEM ist bei Platten in der Regel jedoch nicht möglich.

Weil jede FEM-Lösung eine mit Fehlern behaftete Approximation darstellt, weist die resultierende Momentenverteilung lokale Gleichgewichtsverletzungen auf. Zudem treten örtlich hohe Momentenkonzentrationen auf, die mit zunehmender Elementverfeinerung gegen unendlich streben. Ein Ausbewehren dieser physikalisch unrealistischen, durch die zugrundeliegende Theorie bedingten Singularitäten macht jedoch keinen Sinn.

Um die Problematik der Gleichgewichtsverletzungen und der Singularitäten zu umgehen, wurde das traditionelle Vorgehen der Bemessung am infinitesimalen Plattenelement fallen gelassen und das Konzept der finiten Bemessungselemente entwickelt. Anstelle der Elementspannungen, die das Gleichgewicht nur approximativ erfüllen, werden dabei die Elementknotenkräfte  $p$  betrachtet. Dies sind konzentrierte Kräfte, die von jedem Element an seine Nachbarn übertragen werden (Bild 1).

Sie entsprechen bestimmten Integralen der Spannungen innerhalb des Elements und haben den Vorteil, dass sie nie unendlich gross werden und das Gleichgewicht im Rahmen der numerisch möglichen Genauigkeit exakt erfüllen. Zudem lassen sie sich sehr einfach aus der Elementsteifigkeitsmatrix  $k$  und den Knotenverschiebungen  $a$  berechnen.

$$p = k a$$

Die Grenzwertsätze der Plastizitätstheorie gelten sowohl für Spannungskomponenten am infinitesimalen Element als auch für «verallgemeinerte» Grössen wie Momente, Normalkräfte oder auch Elementknotenkräfte, die Spannungsintegrale darstellen. Damit ist der Weg frei für eine tragsichere Bemessung aufgrund der Knotenkräfte: Jedes finite Element der Masche wird als unabhängige Bemessungseinheit betrachtet, das durch seine Knotenkräfte belastet

wird. Mit Fliessbedingungen für die Knotenkräfte der elastischen Lösung  $p$  wird sichergestellt, dass das Element diese Belastung mit seinem plastischen Widerstand  $m_{pl}$  zu tragen vermag.

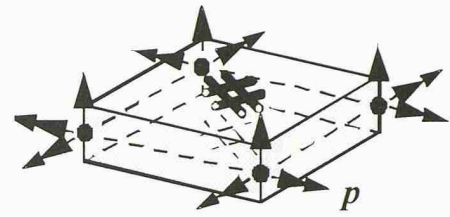
$$F p \leq m_{pl}$$

Diese linearisierten Fliessbedingungen  $F$  basieren auf der klassischen Johannsen'schen Fliessbedingung für Stahlbetonplatten. Auf ihre nichttriviale Herleitung wird hier verzichtet [1] [2]. Der Ablauf einer Bemessung nach diesem neuen Verfahren wird jedoch im Folgenden anhand des Plattenbeispiels von Bild 2 illustriert.

### Elastische Vorbemessung der Bewehrungsfelder

Der erste Schritt, die Vorbemessung der Bewehrungsfelder, beginnt mit einer klassischen linearen FEM-Analyse: Zuerst muss der Ingenieur die Strukturgeometrie, die Materialeigenschaften, die Lagerungsbedingungen und die Belastung (d.h. die Lastfälle und Grenzwertspezifikationen für Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit) definieren.

Aufgrund dieser Daten wird eine FEM-Masche generiert und ein lineares Gleichungssystem aufgestellt, das anschliessend für alle eingegebenen Lastfälle gelöst



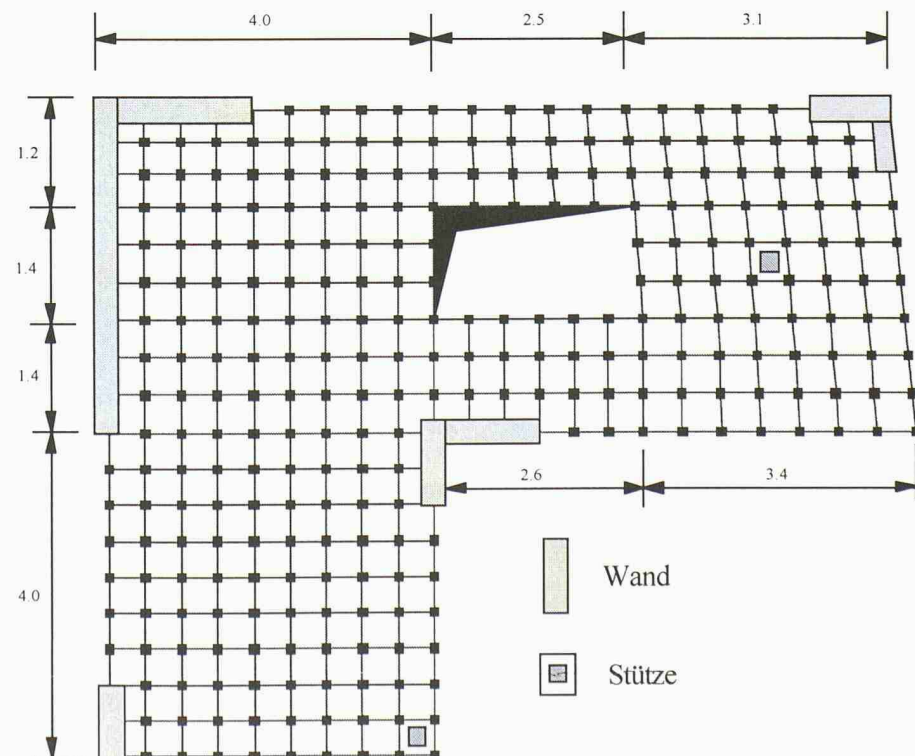
1  
Finites Plattenelement mit Knotenkräften

wird. Aus den resultierenden Knotenverschiebungen werden nun die Auflagerreaktionen, Durchbiegungen, Schnittkräfte und erforderlichen Bewehrungsgehalte für beide Grenzzustände ermittelt. Für die Verhältnisse im Gebrauchszustand liefert diese elastische Analyse eine gute Näherung, weshalb sich die Resultate direkt zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit verwenden lassen.

Für die Bemessung auf Tragsicherheit würden in einem herkömmlichen FE-Programm nun die erforderlichen Bewehrungsgehalte aus den elastischen Schnittkräften ermittelt, die der Ingenieur von Hand mit Bewehrung abdecken müsste.

Beim neuen Bemessungsverfahren bestimmt der Ingenieur jedoch zuerst die Anordnung von polygonalen Bewehrungsfeldern, indem er interaktiv Ausdehnung und Richtung von einzelnen Stab-

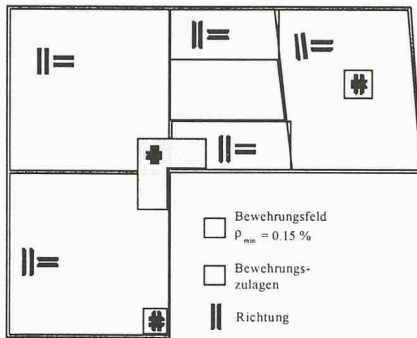
2  
Stahlbetonplatte mit FEM-Masche: Dicke 22 cm, Bemessungslast  $q^* = 25 \text{ kN/m}^2$  (inkl. Last und Materialbeiwerte)



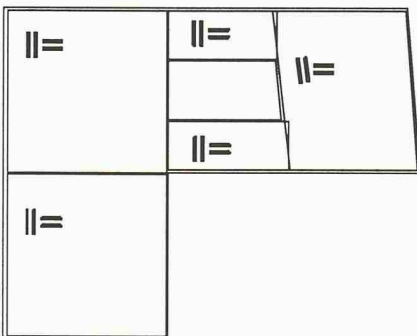
### Bezeichnungen

- $p$  Vektor der Elementknotenkräfte
- $k$  Elementsteifigkeitsmatrix
- $a$  Vektor der Elementknotenverschiebungen
- $m_{pl}$  plastisches Widerstandsmoment pro Breite
- $F$  Matrix der linearisierten Fliessbedingung für Knotenkräfte
- $G_w$  Grenzwert
- $G$  Gesamtgewicht der Bewehrung
- $a_i$  Bewehrungsfläche pro Breite des  $i$ -ten Feldes
- $g_i$  Gewichtsfaktor des  $i$ -ten Bewehrungsfeldes
- $b_j$  Amplitude des  $j$ -ten Eigenspannungszustands
- $p_{hj}$  Elementknotenkräfte des  $j$ -ten Eigenspannungszustands
- $z$  Hebelarm der inneren Kräfte

obere Bewehrungsfelder



untere Bewehrungsfelder



3

Bewehrungsfelder

und Mattenlagen definiert (Bild 3 zeigt die 23 Bewehrungsfelder des betrachteten Plattenbeispiels).

Er wählt diese Bewehrungsanordnung vor allem unter Berücksichtigung konstruktiver Aspekte und gestützt auf seine persönliche Vorstellung einer rationalen Bewehrung. Die aufgrund der elastischen Berechnung für jedes Element bestimmten erforderlichen Bewehrungsgelände dienen ihm dabei als zusätzliche Entscheidungsgrundlage.

Für jedes Bewehrungsfeld wird nun vom Programm automatisch eine elastische Bemessung durchgeführt, bei der sichergestellt wird, dass überall die erforderlichen Widerstände vorhanden sind (Bild 4). Da sich die Bewehrungsfelder gegenseitig überlappen können, führt dies - unter Annahme eines elementweise konstanten inneren Hebelarms  $z$  - zu einem globalen linearen Optimierungsproblem, bei dem ein minimales Gesamtgewicht für die Bewehrung gesucht wird. Als Variablen treten dabei die unbekanntes Bewehrungsflächen der Bewehrungsfelder  $a_i$  auf. Als Ungleichungen werden in jedem finiten Element die linearisierten Fließbedingungen für die Knotenkräfte verwendet. Gemäss dem Einspielsatz der Plastizitätstheorie darf dazu in jeder Fließbedingung ein Grenzwert  $G_w$  der entsprechenden el-

stischen Momentenkombination verwendet werden, womit sich mehrere Lastfälle effizient behandeln lassen.

$$G_w(F p) \leq \sum_i f_y \cdot z \cdot a_i$$

Das Gesamtgewicht der Bewehrung  $G$  wird als lineare Funktion der unbekanntes Bewehrungsflächen  $a_i$  mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren  $g_i$  erfasst und kann somit als Zielfunktion minimiert werden.

$$G = \sum_i g_i \cdot a_i \Rightarrow \text{minimal}$$

Konstruktive Zusatzbedingungen wie z. B. Mindestbewehrung können als weitere Ungleichung bei der Optimierung direkt berücksichtigt werden.

Die so ermittelte Bewehrung erfüllt zwar den Tragsicherheitsnachweis, sie weist jedoch in der Regel ein unvernünftig hohes Bewehrungsgewicht auf. Trotz der Entschärfung der Singularitätenproblematik, die durch die Bemessung mit Elementknotenkräften erreicht wird, weist die Bewehrungsanordnung immer noch örtlich unakzeptabel hohe Konzentrationen auf. Bei der ermittelten Lösung handelt es sich deshalb nur um eine elastische Vorbemessung, die anschliessend durch Momentenumlagerung optimiert werden kann.

### Bewehrungsoptimierung durch Momentenumlagerung

Im zweiten Schritt wird die elastisch vorbemessene Bewehrung durch Umlagerung der Momente optimiert, wobei weiterhin aufgrund eines Gleichgewichtszustands bemessen wird. Für ein statisch unbestimmtes Tragwerk (wie eine Platte) ist der elastische Spannungszustand für eine gegebene Belastung nur einer von unendlich vielen möglichen Gleichgewichtszuständen.

So erzeugt eine plastische Verzerrung, wie auch eine Temperatureinwirkung, einen «homogenen» Eigenspannungszustand, der sich den vorhandenen Spannungen überlagert. Damit erhält man eine neue Spannungsverteilung, die wiederum einen Gleichgewichtszustand bildet. Aufgrund des unteren Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie dürfen deswegen Eigenspannungszustände beliebiger Amplitude überlagert werden, ohne dadurch die Traglast zu beeinflussen.

Darauf beruht die Bemessungsoptimierung: Den elastischen Grenzwerten werden nun Eigenspannungszustände so überlagert, dass das erforderliche Bewehrungsgewicht minimal wird. Dies führt zu

einer Erweiterung des im letzten Abschnitt erläuterten Optimierungsproblems. Als zusätzliche Variablen werden die unbekanntes Amplituden  $b_j$  von geeignet gewählten Eigenspannungszuständen eingeführt und die Fließbedingungen mit den entsprechenden Werten aus der Beanspruchung  $p_{hj}$  ergänzt. Die Zielfunktion bleibt dabei unverändert.

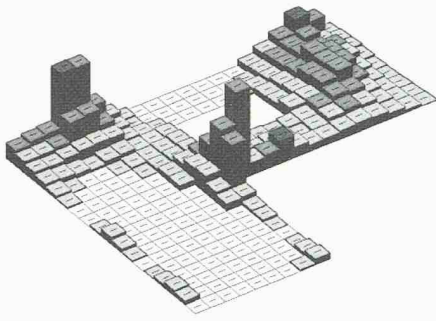
$$G_w(F p) + \sum_j F p_{hj} \cdot b_j \leq \sum_i f_y \cdot z \cdot a_i$$

Diese Bemessungsoptimierung wird vom Programm in einem inkrementellen Verfahren weitgehend automatisch durchgeführt, indem Eigenspannungszustände aufgrund plastischer Krümmungen generiert und in die Optimierung miteinbezogen werden. Der Programmbenutzer kann am Anfang die Zonen definieren, wo plastische Krümmungen eingeführt werden sollen. Danach kann er die Optimierungsschritte am Bildschirm mitverfolgen und jederzeit abbrechen, sobald das Resultat seinen Vorstellungen entspricht (Bild 5). Die Optimierung liefert für jedes Bewehrungsfeld einen erforderlichen Gehalt, der anschliessend in Stabdurchmesser und -abstände bzw. Netztypen umgerechnet wird.

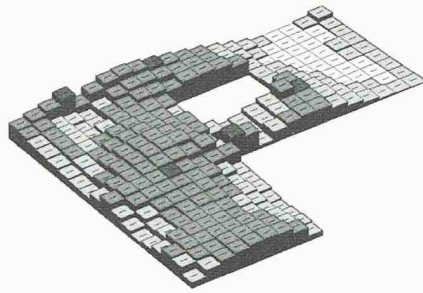
Da die Ingenieurerefahrung bei der konstruktiven Durchbildung der Bewehrung einen massgeblichen Einfluss auf das spätere Tragverhalten und auf die Ausführungskosten ausübt, ist ihr Einbezug für eine praxistaugliche Methode entscheidend. Beim hier vorgestellten Bemessungsverfahren bestimmt der Ingenieur massgeblich die Güte der erzielten Bewehrung, obwohl die Bemessung weitgehend automatisch abläuft. Neben der Spezifikation der Zonen, wo plastische Krümmungen zugelassen sind, und den konstruktiven Zusatzbedingungen (wie minimale Bewehrung) spielt seine Wahl der Bewehrungsfelder eine bedeutende Rolle. Der Optimierungsalgorithmus versucht nämlich mit Momentenumlagerungen die Tragwirkung der Platte den vorgegebenen Bewehrungsfeldern anzupassen, womit der effektiv eingelegte Stahl optimal ausgenutzt werden kann. Dies führt in der Regel zu Stahleinsparungen von 30 bis 50% (33% beim hier betrachteten Plattenbeispiel) gegenüber einer herkömmlichen elastischen FEM-Bemessung. Gleichzeitig können die ausführungstechnisch problematischen Bewehrungskonzentrationen vermieden werden.

### Duktilitätsbedarfs- und Traglastanalyse

Die vorgestellte Bemessungsmethode basiert auf den vereinfachenden Annahmen



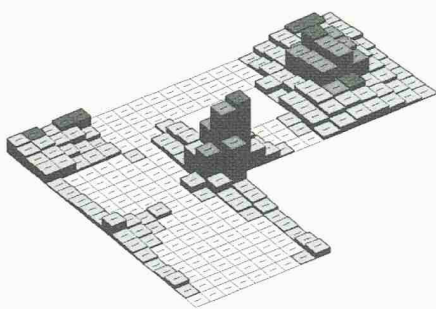
obere Bewehrung



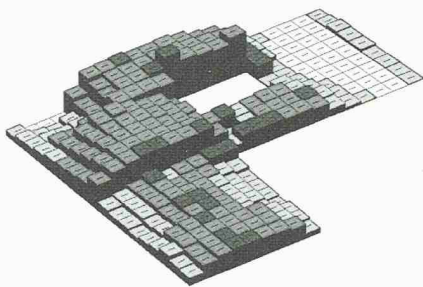
untere Bewehrung

4

Bewehrungsbedarf nach elastischer Bemessung (Gesamtgewicht: 1260 kg)



obere Bewehrung



untere Bewehrung

5

Bewehrungsbedarf nach Bemessungsoptimierung (Gesamtgewicht: 840 kg)



der Plastizitätstheorie, die duktilen Materialverhalten voraussetzt. Die Anwendbarkeit dieser Theorie auf Stahlbetonplatten ist durch zahlreiche Versuche und den jahrzehntelangen, erfolgreichen Einsatz in der Praxis eindrücklich belegt. Bisher wurde stillschweigend angenommen, dass die Duktilität der Baustähle, die für das plastische Verhalten einer Stahlbetonplatte eine entscheidende Rolle spielt, ausreichend vorhanden sei. Angesichts der in den letzten Jahren beobachteten Verminderung der plastischen Verformbarkeit von Bewehrungsstählen taucht jedoch immer öfter die Frage auf, ob deshalb die Anwendung der plastischen Bemessungsmethoden eingeschränkt werden sollte.

Eine Möglichkeit ist die Beschränkung der plastischen Rotationen bei Stählen geringer Duktilität, was eine Analyse des erforderlichen Rotationsbedarfs nach sich ziehen würde. Da das hier präsentierte Bemessungsverfahren ausgiebig von plastischen Rotationen Gebrauch macht, stellt eine solche Analyse eine sinnvolle Ergänzung zur Bemessung dar. Aus diesem Grund wurde in Platon ein Berechnungsmodul implementiert, das den Duktilitätsbedarf für eine Bewehrungsan-

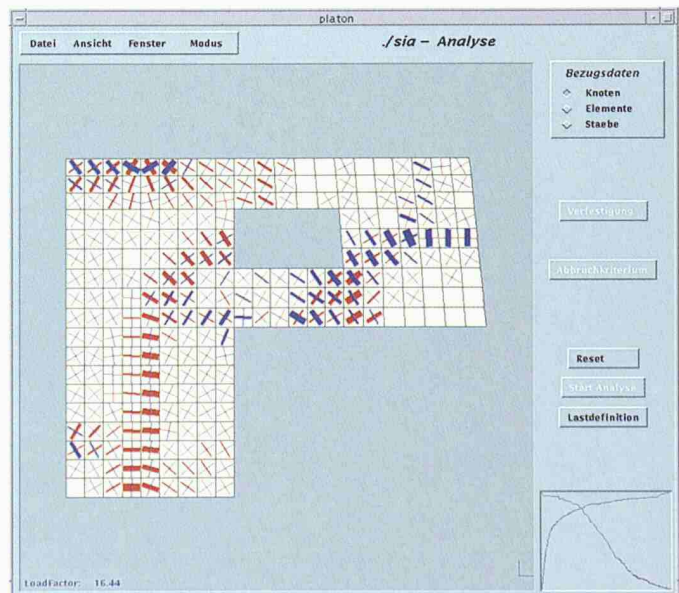
ordnung aufgrund einer angegebenen Belastung ermitteln kann.

Eine genaue Analyse einer Stahlbetonplatte erfordert ein aufwendiges, dreidimensionales Strukturmodell mit Biege- und Membranwirkung und ein komplexes nichtlineares Materialmodell von Stahl,

Beton und deren Verbund. Eine exakte rechnerische Ermittlung des plastischen Rotationsbedarfs ist jedoch selbst bei einer umfassenden Modellierung in der Regel nicht möglich, da genaue Kenntnisse über die Last-Verformungsgeschichte (inkl. Kriechen, Schwinden, Temperatureinflüssen

6

Programmoberfläche mit Darstellung der plastischen Hauptkrümmungen. Die negativen Krümmungen sind rot, die positiven blau eingetragen. Die Intensität wird mit der Strichstärke verdeutlicht



usw.) notwendig wären, was wohl nie zutrifft.

Um dennoch eine gute Abschätzung des erforderlichen Rotationsvermögens zu erreichen, wurde die Stahlbetonplatte analog zum Bemessungsmodell als Kirchhoffplatte modelliert und ein neues, elastoplastisches Materialmodell mit Verfestigung eingebaut. Die nichtlineare Modellierung des Materials erfolgt nicht auf der Stufe von Spannungen und Dehnungen (bzw. Momenten und Krümmungen), sondern als Erweiterung des Konzepts des finiten Bemessungselements mittels Elementknotenkräften. Die Verformungseigenschaften jedes teil- oder vollplastifizierten Elements werden dabei im Raum der Knotenkräfte unter Annahme einer assoziierten Fließregel bestimmt [3]. Ein kinematisches Verfestigungsverhalten kann berücksichtigt werden. Die Bestimmung des Duktilitätsbedarfs erfolgt nach dem iterativen Verfahren nach Newton-Raphson, bei dem die Belastung inkrementell gesteigert wird, bis das System instabil oder in einer Bewehrungslage die obere Grenze der plastischen Dehnungen erreicht wird.

Damit kann man im Anschluss an eine Bemessung sehr einfach eine Analyse durchführen, wobei als zusätzliche Eingabe nur die untersuchte Belastung und die Obergrenze der plastischen Krümmungen spezifiziert werden muss. Bricht das inkrementelle Verfahren ab, so erhält man als Resultat die Verteilung des plastischen Rotationsbedarfs und die Strukturverformung für die erreichte Laststufe.

Dieselbe Berechnungsmethode kann auch zur Ermittlung der Tragsicherheit bestehender Stahlbetonplatten verwendet werden, indem die Bewehrung direkt, d. h. ohne vorherige Bemessung, eingegeben wird. Das Programm versucht dann die

Belastung soweit zu steigern, bis eine Systeminstabilität erreicht oder die Stahlduktilität erschöpft ist. Als Resultat erhält man den Traglastfaktor für die angegebene Belastung.

### Schlussbemerkungen

Zur Bestimmung der erforderlichen Bewehrung von Stahlbetonplatten verwendet man heute häufig elastische FEM-Programme. Für die Bemessung auf Tragsicherheit lassen sich jedoch oft keine befriedigenden Lösungen erzielen, weil die plastischen Schnittkraftumlagerungen, die unrealistisch hohe Momenten- und damit Bewehrungskonzentrationen verhindern und den Widerstand der gesamten Bewehrung mobilisieren, ausser Betracht gelassen werden. Wegen der Vernachlässigung des plastischen Materialverhaltens eignet sich die lineare FEM auch nicht zur Abschätzung der Tragsicherheit bestehender Strukturen, was in der Praxis immer häufiger gefragt ist.

Mit dem hier vorgestellten, computerunterstützten Berechnungsverfahren wurde versucht, dem projektierenden Ingenieur ein effizientes, benutzerfreundliches Werkzeug zur Verfügung zu stellen, das die Bewehrung rational zu gestalten hilft und die Traglast auf einfache Art und Weise ermittelt. Die verwendeten Grundkonzepte sind allgemein, so dass sie mit Erfolg auch auf Scheiben und Schalen angewendet wurden [4]. Das dabei entstandene Computerprogramm Platon ist als reines Forschungsinstrument nicht direkt für den Einsatz in der Praxis geeignet. Die darin implementierten, erfolgversprechenden Konzepte fanden jedoch Eingang in die neue Version des bekannten Plattenprogramms Cedrus.

### Literatur

[1] *Anderbeggen E., Despot Z., Steffen P., Tabatabai M.*: Linearisierte Fließbedingungen für ein Finites Element aus Stahlbeton: Theoretische Grundlagen. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, IBK-Publikation Nr. SP-004, 1995

[2] *Steffen P.*: Elastoplastische Dimensionierung von Stahlbetonplatten mittels Finiter Bemessungselemente und Linearer Optimierung. IBK-Bericht Nr. 220, Birkhäuser Verlag, Basel 1996

[3] *Anderbeggen E., Glanzer G., Steffen P.*: Yield Surfaces in the Element Nodal Force Space. Computer & Structures, Veröffentlichung folgt 1999

[4] *Anderbeggen E., Steffen P., Despot Z., Tabatabai S.M.R.*: Computer-Aided Dimensioning of Reinforced Concrete Wall and Flat Slab Structures. IABSE Zurich, Structural Engineering International, 1/1994

### Hinweis

Um dieses Berechnungsverfahren den Ingenieuren aus der Praxis vorzustellen, wird am 26. März 1999 eine Fachtagung an der ETH Zürich durchgeführt. Unter dem Titel «Berechnung von Stahlbetonplatten: Ein neues computerbasiertes Verfahren» werden die zugrunde liegenden Konzepte näher erläutert und die Verwendung der darauf basierenden Computerprogramme aufgezeigt (siehe auch unter der Rubrik «Veranstaltungen» am Schluss dieser Ausgabe).

Adresse der Verfasser:

*Edoardo Anderbeggen*, dipl. Ing., ETH/SIA, Prof. Dr. sc. techn., IBK, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich, *Patrick Steffen*, dipl. Ing., Dr. sc. techn., Cubus AG, Eggbühlstr. 20, 8052 Zürich, *Günter Glanzer*, Dipl.-Ing., IBK, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich